

## КИСЛОТНЫЙ ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА: СУЩНОСТЬ И ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В.С. Кононов

Научный руководитель - профессор О.С. Чернова

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Существует большое количество разновидностей гидроразрыва пласта в связи с широким распространением этого метода воздействия на призабойную зону и длительной практикой его применения. Одной из разновидностей метода является гидроразрыв с использованием растворов соляной кислоты в качестве жидкости разрыва. Кислотный гидроразрыв применяют в трещиновато-кавернозных карбонатных коллекторах, так как там этот способ наиболее эффективен. Большая часть запасов нефти, содержащихся в карбонатных породах-коллекторах, относится к трудноизвлекаемым, и около трети от этих запасов, по отечественным и зарубежным оценкам, можно извлечь только с применением технологии кислотного гидроразрыва, поэтому она должна играть важную роль в разработке подобных запасов. [4] Кроме того, помимо карбонатных пород кислотный гидроразрыв находит своё применение и в песчаниках с тонкими прослоями глины, и не только как метод интенсификации притока, но и как метод улучшения приёмистости нагнетательных скважин. [2]

Сущность кислотного гидроразрыва заключается в применении в рамках одного технологического процесса двух физико-химических воздействий на призабойную зону. Расклинивание пород происходит не только за счёт высоких давлений и темпов нагнетания жидкости разрыва, но и за счёт химических реакций кислоты с породами. Кислота вытравливает каналы вдоль поверхности трещин, поэтому нет необходимости в их креплении проппантами, так как поверхности получаются неровными, и трещины не могут плотно сомкнуться после снижения давления. [5,2]

Применение кислотного гидроразрыва имеет ряд ограничивающих факторов. Взаимодействие соляной кислоты разной концентрации с известняками характеризуется следующими данными: 1 м<sup>3</sup> 7,5 % HCL растворяет 105 кг CaCO<sub>3</sub>, при выделении 26 м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>, 15% HCL растворяет 210 кг CaCO<sub>3</sub> с выделением 52 м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>. Кроме того, при уменьшении концентрации увеличивается и объём жидкости, и время закачки в пласт, а значит и время контакта кислоты с поверхностью труб. Несмотря на то, что 21% HCL наиболее эффективна, целесообразными считаются концентрации 10-15%. [2] Другим ограничивающим фактором является прочность пород. Если порода не способна поддерживать проводимость вытравленных кислотой каналов в трещинах, операция кислотного гидроразрыва будет неэффективной. К такой породе, например, можно отнести мел, где величина модуля Юнга меньше 5-10×10<sup>5</sup> psi. Ещё одним ограничивающим фактором является количество профильтровавшейся в пласт жидкости. Чем глубже кислота проникнет в пласт, тем выше будет эффективность проведённой операции.

Для оптимизации параметров кислотного гидроразрыва и получения наибольшей длины трещин были разработаны различные технологические решения. Эффективный кислотный гидроразрыв проводят в несколько этапов. 1) Закачка “подушки”, инертной вязкой жидкости для создания системы трещин 2) Закачка вязкой кислоты, которая, собственно, вытравливает в поверхности трещины каналы проводимости 3) Закачка инертного геля-разделителя, для поддержания роста трещины путём вытеснения не прореагировавшей кислоты в конец трещины 4) Закачивание вязкой кислоты для дальнейшего взаимодействия её с поверхностью трещины 5) Закачка инертного геля-вытеснителя для продавливания загущённой кислоты в трещину 6) Обработка закрытой трещины с целью увеличения проницаемости призабойной зоны 7) Продавливание оставшейся в скважине кислоты в пласт.

В качестве подушки и геля-разделителя могут использоваться различные типы сшитых жидкостей разрыва, представленные, в основном, жидкостями на водной основе. Такие жидкости инертны, поэтому в них добавляют стабилизаторы температуры для сохранения эффективности при создании первоначальной трещины. Именно “подушка” создаёт основную длину трещины, так как она в меньшей степени фильтруется в пласт по сравнению с кислотой. Гель-разделитель впоследствии подаётся в скважину для компенсации давления, падающего во время закачивания кислоты. Вязкие кислоты получают при добавлении полимеров. Это помогает снизить скорость реакции кислоты с породами и фильтрацию её в пласт. Вязкая кислота имеет меньшую плотность, поэтому она проникает через подушку и реагирует со стенками трещины, образуя проводимые каналы. [5] Вследствие различных значений вязкости кислоты и инертной жидкости подушки кислота проникает в трещины разветвлённо, образуются так называемые “языки”. Наличие языков может играть положительную роль, расстояние проникновения кислоты увеличивается вследствие увеличения скорости её проникновения. [1] Эмульгированные кислоты обычно являются эмульсиями кислоты и нефти в различных соотношениях. Наличие нефти замедляет взаимодействие кислоты с породами пласта, вследствие чего образуются более протяжённые трещины. Также наличие нефти негативно сказывается на проницаемости газа, поэтому эти эмульсии не рекомендуют к применению в газовых пластах. Эмульгированные кислоты применяются чаще всего в низкопроницаемых пластах, где особенно важна длина трещины, несмотря на то, что эти кислоты обладают более слабой растворяющей способностью по сравнению с вязкими кислотами. Помимо соляной кислоты в кислотном гидроразрыве применяются растворы органических кислот, таких как уксусная и муравьиная. При высоких температурах их растворяющая способность сравнима с 15% соляной кислотой, кроме того, они менее интенсивно изнашивают оборудование. [5]

Кислотный гидроразрыв пласта относится к одним из самых высокочрезвычайных операций в нефтедобыче. В настоящее время он может считаться экономически целесообразным при увеличении продуктивности скважин в 2-3 раза с успешностью 85-90%, при продолжительности эффекта минимум 2-3 года. [4]

При проектировании кислотного гидроразрыва для конкретных геологических условий необходимо задавать индивидуальные параметры операции в зависимости от ожидаемого результата. Например, такие как тип кислоты, её концентрация, состав инертных жидкостей подушки и разделителя, объёмы этих жидкостей для

закачивания, давление и температура, при которых будет проводиться операция. Исследования в области применения кислотного гидроразрыва направлены в основном на то, чтобы запроецированные параметры соответствовали геолого-техническим условиям проведения операций с целью повышения их успешности и длительности эффекта от них. В частности, в работах [4] и [3], 2011-го и 2017-го годов опубликованы результаты подобных исследований для нефтяных месторождений Удмуртии и Татарстана соответственно.

Для месторождений Удмуртии после проведения анализа показателей разработки было выявлено, что между успешностью проведения кислотного гидроразрыва и техногенной нагрузкой на скважину (проведение геолого-технических мероприятий по воздействию на пласт, например, предыдущие соляно-кислотные обработки и гидроразрывы, текущие и последующие темпы отбора жидкости) существует зависимость: чем больше было проведено мероприятий, тем ниже успешность планируемого кислотного гидроразрыва и чем выше последующий темп отбора жидкости, тем меньше сохраняется эффект от операции. В связи с этим был выбран и научно-технически обоснован критерий агрегативной стойкости водонефтяной эмульсии (способность системы к сохранению постоянной дисперсности), характеризующий изменение состояния пласта после проведения геолого-технических мероприятий перед операцией кислотного гидроразрыва. При стабилизации величины агрегативной устойчивости необходимо ограничивать соляно-кислотные обработки перед этой операцией. Был также разработан безреагентный метод регулирования таких параметров нефтекислотных жидкостей разрыва как вязкость, время жизни и реакционная способность при различных концентрациях соляной кислоты. При заданном времени жизни реакционная способность может быть увеличена в 3-45 раз. Для продления эффекта от кислотного гидроразрыва были разработаны: а) методики нормирования отбора жидкости в зависимости от изменения величины агрегативной устойчивости, б) составы для разрушения вязких эмульсий и механических примесей, образование которых связано с высокими темпами отбора жидкости, в) внесение изменений в конструкцию УЭЦН для повышения длительности их работы. Применение всего вышеописанного для повышения эффективности кислотного гидроразрыва на месторождениях Удмуртии позволило увеличить продуктивность скважин в 3 раза при сохранении эффекта от операции до 2,2 года. [4]

Для карбонатных пластов нефтяных месторождений Татарстана в отношении кислотного гидроразрыва проводилась разработка промысловых методов поиска параметров операций, проектирования этих операций на основе аналитических моделей, разработка технических решений для совершенствования технологии в промысловых условиях. Были экспериментально определены скорость и порядок реакции растворения карбонатов в кислотных жидкостях разрыва при высоких давлениях, без выделения углекислого газа в отдельную фазу. Были выявлены закономерности влияния сжимающего напряжения на проводимость трещины после кислотного гидроразрыва: а) наиболее интенсивное снижение проницаемости трещины происходит в диапазоне напряжений 10-15 МПа (при депрессии в скважине 4-9 МПа); б) наиболее интенсивно уменьшается проницаемость трещин в породах башкирского яруса (более чем в 500 раз), породы турнейского яруса более устойчивы к нагрузке. Было также установлено, что наилучшее соотношение проводимости и длины трещины достигается при концентрациях HCL 18-20%, а также, что максимальное отношение длины протравленной и гидравлически созданной трещин соответствует значениям 0,5-0,7 соотношения объемов буферной жидкости и кислоты. В результате данных исследований, а также в контексте исследований оптимизации процессов гидроразрыва для месторождений Татарстана в целом были разработаны: 1) метод унифицированного дизайна для трещин кислотного гидроразрыва 2) критерий кислотного гидроразрыва – более 6 м<sup>3</sup> 15-20% HCL на 1 м вскрытой толщины пласта 3) алгоритм и программа расчёта кислотного гидроразрыва в EXCEL для выполнения дизайна кислотной трещины 4) расчёт проницаемости кислотной трещины методом эквивалентного проппанта с применением коммерческого симулятора MFrac. Внедрение полученных автором работы [3] результатов позволило получить средний прирост дебита в 1,44 раза по сравнению со средними показателями и прибыль в размере 78,4 млн руб.

#### Литература

1. Басарыгин Ю.М., Будников В.Ф., Булатов А.И., Яремичук Р.С. Исследование факторов и реализация мер долговременной эксплуатации нефтяных и газовых скважин. В шести тт. Т. 4, книга 2. Гидроразрыв пласта / Отв. ред. А.И. Булатов. – Краснодар: ООО "Просвещение-Юг", 2004. – 357 с.
2. Меликбеков А.С. Теория и практика гидравлического разрыва пласта. – М.: Недра, 1967. – 141 с.
3. Салимов Олег Вячеславович. Гидравлический разрыв карбонатных пластов нефтяных месторождений Татарстана: диссертация ... доктора технических наук: 25.00.17 / Салимов Олег Вячеславович; [Место защиты: ПАО Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти публичного акционерного общества Татнефть имени В.Д. Шашина], 2017
4. Федоров, Юрий Викторович. Повышение эффективности кислотного гидравлического разрыва пласта в карбонатных коллекторах: диссертация ... кандидата технических наук: 25.00.17 / Федоров Юрий Викторович; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т]. – Уфа, 2011. – 99 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/2915.
5. OGC/PetroSkills Hydraulic Fracturing Applications, Alfred R. Jennings, Jr./ PE Enhanced Well Stimulation, Inc., 2003 – 168 с. Перевод: Денис Малахов.